Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 5, pp.90-95 (2005)

Copyright © 2005 KSAE
1225-6382/2005/077-12

평판에서 타원공의 형상에 따른 피로도지수

송 준 혁[1] · 島本 聰[2] · 나 석 찬[3] · 유 효 선[3] · 강 희 용[3] · 양 성 모[*3]

(재)전주기계산업리서치센터[1] · 琦玉大學校 機械工學科[2] · 전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술연구센터[3]

Fatigue Quality Index of Elliptical Holed Plate

Joonhyuk Song[1] · A. Shimamoto[2] · Seokchan Nah[3] · Hyosun Yu[3] · Heeyong Kang[3] · Sungmo Yang[*3]

[1]*Jeonju Machinery Research Center, 750-1 Palbok-dong, Duckjin-gu, Jeonbuk 561-844, Korea*
[2]*Department of Mechanical Engineering, Saitama Institute of Technology, 1690 Fusaiji, Okabe, Saitama 369-0293, Japan*
[3]*Division of Mechanical & Aerospace System Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea*
(Received 14 March 2005 / Accepted 14 July 2005)

Abstract : Most of mechanical structures are composed of many substructures connected to one another by various types of mechanical joints with various shapes of cutouts. It is important to study these connected structures under dynamic forces for evaluation of stress concentration. In this paper, a FQI(fatigue quality index) analysis using the concept of SF(severity factor) is performed to various shape of elliptical hole. The SF is affected by the location of cutout in plate and radius ratio, static SF is analyzed with finite element analysis and the equation of FQI for predicting a dynamic SF is formed.

Key words : FQI(fatigue quality index, 피로도지수), Elliptical hole(타원공), SF(severity factor, 가혹도계수), radius ratio(반경비), Notch ratio(노치 곡률반경)

Nomenclature

α	: hole condition factor
β	: hole filling factor
σ_{ref}	: reference stress(MPa)
$\sigma_{\max}$	: max. stress(MPa)
σ_1	: local stress by bypass load P(MPa)
σ_2	: local stress by transfer load ΔP(MPa)
λ	: material constant
ρ	: material constant
a	: diameter of elliptical hole along to direction of P
b	: diameter of elliptical hole along to perpendicular direction of P
d	: diameter of elliptical hole along to direction of P
k_{tb}	: local stress concentration factor by ΔP
k_{tg}	: local stress concentration factor by P
FQI	: fatigue quality index
P	: bypass load
ΔP	: transfer load
SF	: severity factor
t	: thickness of plate
w	: width of plate

*To whom correspondence should be addressed.
yangsm@chonbuk.ac.kr

1. 서 론

구조물은 기본 구조 위에 여러 부구조물의 결합에 의하여 다른 시스템과 공유되어 복잡한 종합 구조물을 형성하게 된다. 이때 각 부구조물 사이의 신호전달 등을 위한 통로 등의 설치가 요구되어 부득이 하게 구조부재를 관통하는 경우가 발생한다.[1] 또는, 구조물의 경량화를 위하여 구조부재에 의도적으로 구멍을 가공하는 경우가 발생한다. 구조물을 설계하는 과정에서 구멍의 위치와 형상이 구조물의 응력분포 변화 및 응력집중 위치에 미치는 영향을 고려하지 않는 경우, 구멍에 의한 결함경계부에 응력집중현상이 발생되어 원래 모재 강도보다 약 30%~40% 정도의 강도저하를 초래한다.[2,3] 따라서, 구멍을 가지는 구조물의 응력분포에 영향을 미치는 파라메터 변화에 대한 연구가 진행되어져 왔다.[4,5]

이상의 방법은 정적하중에 대한 연구로서 실제 구조물의 동적하중에 의한 응력집중현상을 정량적으로 평가하기 위해서는 동적실험을 수행하여야 한다. Lee 등은 동적광탄성 실험에 의하여 응력이완 노치부근에서의 접촉특이응력을 해석하였으며, Yang 등은 적외선 응력측정법에 의하여 일정한 크기의 동적하중을 받는 점용접부의 유효너깃크기 및 응력집중계수를 해석하였다.[6,7]

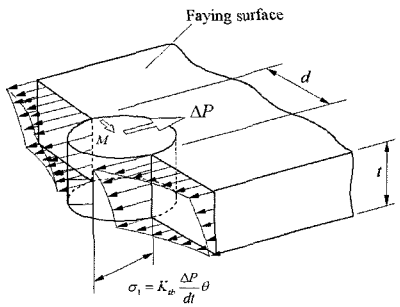
설계초기단계에서는 현실적으로 많은 어려움이 있다. 이에 대한 하나의 대책은 동적효과를 적절한 방법으로 등가정적문제로 치환하여 다루는 것이다. 또한, 동적하중 하에서 볼트 또는 리벳 등에 의한 기계적 결합부는 응력집중현상이 발생하여 원래의 원형구멍에 비교하여 타원형의 변형이 발생할 수 있다. 구멍의 형상변화 즉, 타원공을 가지는 평판의 응력집중현상에 대한 평가가 필요하다.

본 논문에서는 기계적 결합 구조물의 피로수명과 피로응력집중현상을 평가하기 위한 기초연구로서 타원공을 가지는 평판에 대하여 피로도지수(FQI : fatigue quality index)를 제안하였다. FQI는 정적해석에 의한 기계적 결합구조물의 가혹도계수(SF; severity factor)로부터 피로하중에 의한 응력집중현상을 평가하기 위한 평가지표이다.[8] 다양한 타원공 구하였다. 광탄성 실험 및 적외선 열탄성 실험에 의한 응력집중계수와 비교하여 FQI를 구하는 식을 구성하였다.

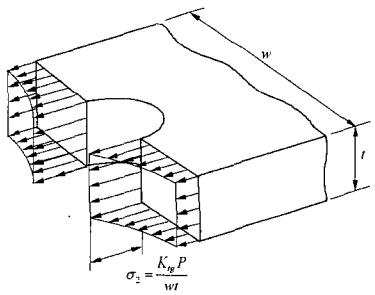
2. 가혹도계수에 의한 피로도지수

가혹도계수(SF; severity factor)는 구멍을 가지는 구조물 및 결합체(볼트, 리벳)의 재질과 형상에 따른 응력집중현상을 평가하기 위한 지표로서 기준응력 σ_{ref}에 대한 구멍위치에서의 최대응력 $\sigma_{\max}$의 비로 표현된다. SF는 기존 응력집중계수를 보완하는 개념으로서, 판에 존재하는 구멍, 노치 등 기하학적 형상 변화 및 하중조건에 따른 응력집중현상을 평가할 수 있지만, 기계적 결합 구조물에서 결합체(볼트, 리벳)의 재질 변화(또는 응력변화) 및 형상에 따른 영향을 반영하지 못하는 점을 보완한 개념이다.

식 (1)에서 최대응력은 Fig. 1과 같이 구멍위치에서의 트랜스퍼 로드(transfer load)에 의한 국부응력집중계수 K_{tb}를 고려한 응력 σ_1과 바이패스 로드(bypassing load)에 의한 국부응력집중계수 K_{tg}를 고려한 응력 σ_2의 합이다.



(a) Transfer load



SF는 식 (2)와 같이 최대응력과 기준응력의 비에 대하여, 구멍 가공방법 및 구멍의 충진효과에 따른 인자 α, β를 Table 1과 Table 2에서 고려하여 기계적 결합 구조물의 응력집중현상을 평가하기 위한 응력집중계수이다.[9]

$$\sigma_{\max} = K_{tb}\frac{\Delta P}{dt} + K_{tg}\frac{P}{wt} \quad (1)$$

$$SF = \frac{\alpha\beta}{\sigma_{ref}}\left[K_{tb}\frac{\Delta P}{dt} + K_{tg}\frac{P}{wt}\right] \quad (2)$$

FQI는 유한요소해석에 의한SF로부터 동적하중에 의한SF를 평가하기 위한 피로도지수이다. 피로하중과 같은 동적하중에 대하여는 실험에 의한 적절한 보정계수를 고려한 FQI 개념을 도입하여 평가하여야 한다.

Table 1 Hole condition factor, α

Fillet radii	1.0~1.5
Standard hole drilled	1.0
Broached or reamed	0.9
Cold worked holes	0.7~0.8

Table 2 Hole filling factor, β

Open holes	1.0
Lock bolt(steel)	0.75
Rivets	0.75
Threaded bolts	0.75~0.9
Taper-lock	0.5
Hi-lock	0.75

3. 실험 및 해석

3.1 시험편

Fig. 2와 같이 길이 170mm, 폭 40mm, 두께 6mm인 평판에 하중작용방향에 대한 타원의 직경 d_1이 8mm이고, 다른 직경 d_2이 16mm, 8mm, 5.3mm 그리고 4mm로 변화하는 타원공을 가공하여 실험 및 해석에 의한 응력집중계수 및 SF를 해석하고, 이를 이용하여 FQI를 계산하였다.

3.2 유한요소해석에 의한 SF

Fig. 2와 같이 타원공을 가지는 에폭시 레진 시험편에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3은 타원공의 반경비 1.5에 대한 유한요소모델 예이다. 유한요소 타입은 타원공 주변을 미세분할 하기 위하여 두께를 가지는 6노드 삼각형(solid triangle) 요소를 적용하였다. 메쉬 기본 크기는 1로 모델링 하였고, 타원공의 선을 따라 에지(edge)의 최소 길이에 0.5를 적용하여 노드간 응력기울기 변화를 최소화 하였다. 하중조건은 시험편의 양끝단에 $980N$이 작용하는 것으로 하였으며, 중심선을 따라 대칭(symmetric) 경계조건을 적용하였다.

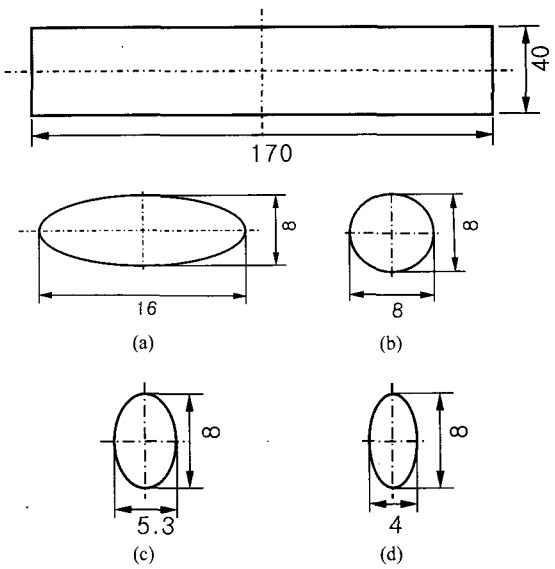


Fig. 2 Specimen with varying elliptical hole radius ratio d_1/d_2, where diameter d_1 is 8mm and diameters d_2 are 16mm, 8mm, 5.3mm and 4mm.

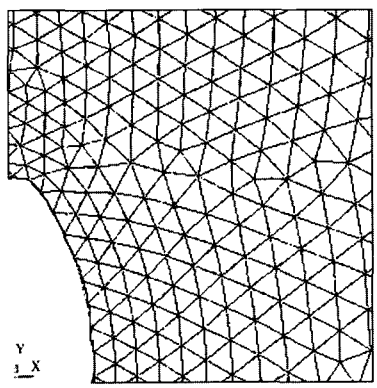
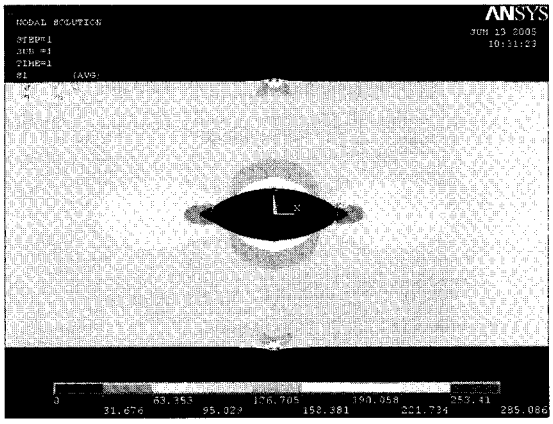
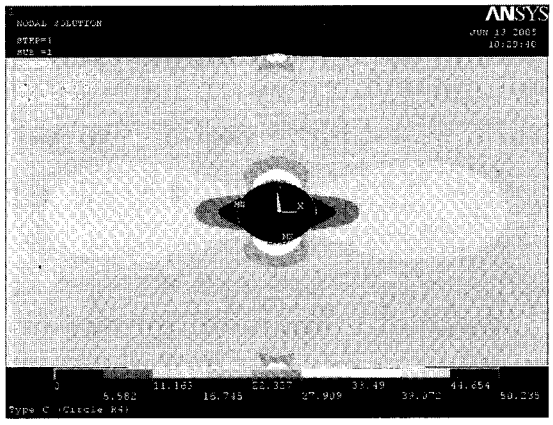


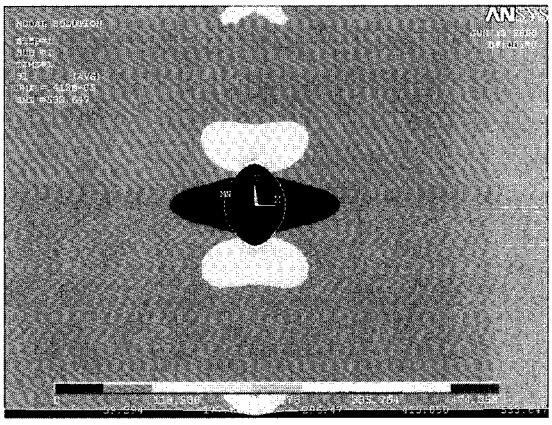
Fig. 3 Finite element models varying radius ratio $d_1/d_2 = 1.5$, where diameter d_1 is 8 mm and diameter d_2 is 5.3mm



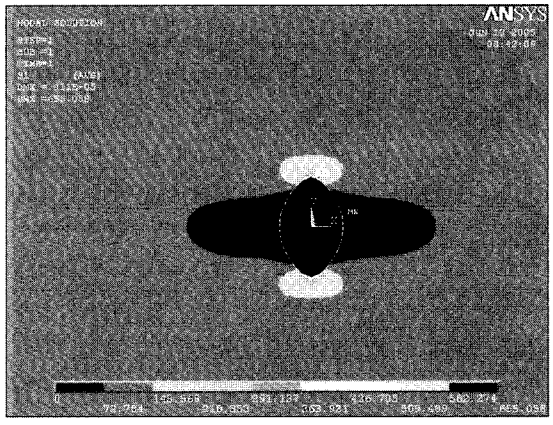
(a) Radius ratio 0.5(d_2=16mm)



(b) Radius ratio 1.0(d_2=8mm)



(c) Radius ratio 1.5(d_2=5.3mm)



(d) Radius ratio 2.0(d_2=4mm)

Fig. 4 Results of finite element analysis for diameter d_1 is 8mm and diameters d_2 are 16mm, 8mm, 5.3mm and 4mm

Fig. 4는 유한요소해석결과이다. 타원공 주변에 응력이 집중되며 특히 하중의 직각방향에서 최대 응력이 발생하였다. 반경비 1인 경우 최대응력이 50.2MPa에 비교하여 0.5→285.1MPa, 1.5→533.6 MPa 그리고 2→655.1MPa이다.

3.3 열탄성 및 광탄성 실험에 의한 SF

재료의 온도분포에 의한 응력측정 즉, 적외선 온도측정법에 의한 응력측정과 광탄성에 의한 응력평가는 이미 그 정확성을 인정받고 있다. 특히 적외선 응력측정법은 0.001°C의 변화까지 감지할 수 있어 최근 응력측정에 많이 적용되고 있다.[10,11]

Fig. 2와 같은 시험편에 대하여 적외선 온도측정에 의한 응력측정 실험을 수행하였으며, 광탄성 실험 및 열탄성응력해석은 Shimamoto의 결과를 이용하였다.[12] Shimamoto는 타원공을 가지는 본 논문에서와 같은 에폭시 레진 시험편에 대하여 광탄성실험과 열탄성실험을 수행하였다. 광탄성실험은 Tension/RTM-1T를 이용하였고, 열탄성실험은 일정주파수(10kHz)로 시험편에 980N의 반복하중을 부가하고, 적외선 응력 화상 시스템 (DELTA-THERM TSA 1000, Stress Photonics Corp.)을 이용하여 응력을 측정하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

4. 고 찰

Fig. 5는 타원공의 반경비에 대하여 유한요소해석에 의한 SF를 도시한 것이다. 반경비 1.0을 기준으로하여 2.0까지 즉, 타원의 장축이 하중방향의 직

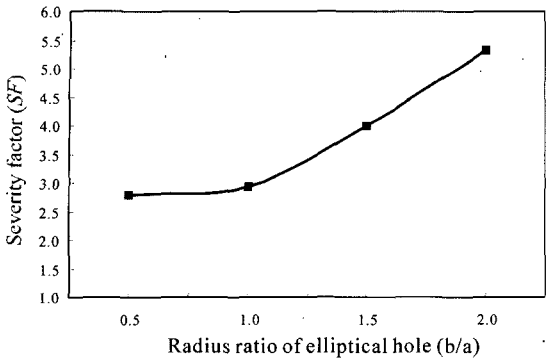


Fig. 5 Severity factor with radius ratio of elliptical hole by FEM

각방향에 있는 경우 SF 의 기울기가 일정한 선형성을 보임을 알 수 있다.

하중방향에 대하여 장축이 일정하고 반경비만이 변화하는 경우에 대하여 타원공의 반경비가 증가함에 따라 SF 가 증가하였다.

Fig. 6은 Shimamoto의 실험결과[12]로부터 정적 광탄성 해석 및 동적 적외선 응력측정에 의한 응력집중계수 선도를 다시 그린 것이다. 열탄성실험에 의한 경우가 광탄성에 의한 경우보다 약간 작게 나타났다. 시험편의 연성 특성이 강하여 동적하중(열탄성실험)에 의한 경우가 정적하중(광탄성실험)에 의한 결과보다 최대응력이 작기 때문으로 판단된다.

유한요소해석에 의한 정적 SF와 마찬가지로 반경비 1.0을 기준으로 하여 2.0까지는 거의 일정한 기울기로 변화하고 있다. 정적유한요소 해석에 의한

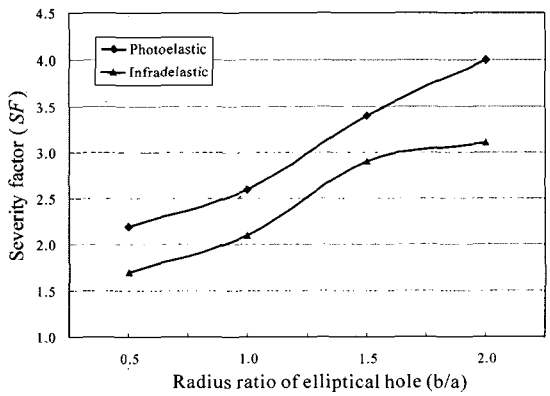


Fig. 6 Severity factor with radius ratio of elliptical hole by photoelasticity method and thermal elasticity method[12]

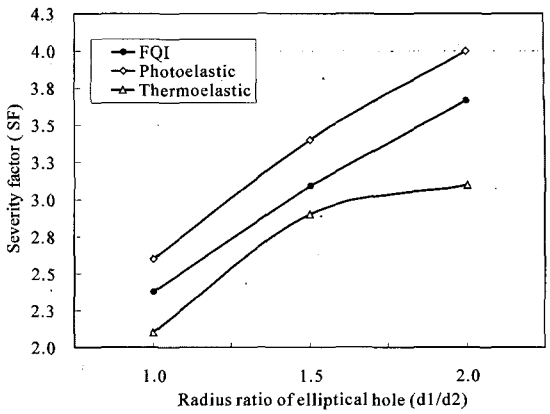


Fig. 7 Fatigue quality index compare to severity factor from photoelastic and thermal elastic measurement

SF가 실험에 의한 경우보다 높게 해석되었다. 이는 실험재료인 에폭시레진의 연성 특성 때문으로 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 반경비가 1보다 큰 경우에 대한 타원공의 정적해석에 의한SF 에 대하여 적절한 보정계수를 이용하여 동적하중에 의한 응력집중현상을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에서 실험결과를 각각 상한과 하한으로 하여 FQI 와 λ,ρ 를 계산하였다.

· 반경비가 d_1/d_2 인 타원공을 가지는 구조물에 대하여 유한요소해석에 의한 SF와 광탄성실험 및 열탄성실험에 의한 보정계수 λ,ρ 를 이용하여 식 (3)과 같은 실험식을 제안하였다. FQI 는 정적해석에 의한 SF와 타원공 반경비의 곱에 자연로그를 취하고, 동적실험에 의한 보정계수 λ와 ρ를 이용하여 다음과 같은 실험식을 세웠다.

$$FQI = \lambda \ln\{SF(b/a)\} + \rho \tag{3}$$

여기서, $\lambda = 0.7\sim1.2$, $\rho = 1.9\sim0.7$

Fig. 7은 유한요소해석에 의한 SF와 보정계수 $\lambda = 1$와 $\rho = 1.3$인 경우의 $FQI = \ln\{SF(b/a)\} + 1.3$ 를 도시한 것이다.

5. 결 론

타원공의 반경비 변화에 따른 유한요소해석에 의한 SF로부터 피로하중에 의한 SF를 평가하기 위한 기초연구로서 FQI 식을 세웠다. 본 논문의 결론

은 다음과 같다.

1) 타원공의 반경비 변화에 대하여 유한요소해석에 의한 SF 및 광탄성실험과 열탄성실험에 의한 SF를 해석하였으며, SF는 반경비가 1.0 이상인 경우 일정한 기울기로 증가하므로 보정계수에 의하여 동적상황을 모사할 수 있음을 확인하였다.
2) 타원공을 가지는 구조물에 대해, 정적해석에 의하여 동적하중에 의한 응력집중현상을 평가하기 위하여 다음과 같은 FQI를 제안하였다.

$$FQI = \lambda \ln \{SF(b/a)\} + \rho$$

References

1) H. Y. Jeon, R. W. Sung and G. J. Han, "The Stress Analysis of the Cross Beam of the Elastic Car-body according to the Change of Location and Shape of Circular Hole," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.16, No.9, pp.9-17, 1999.
2) H. S. Maruyama and D. Geiyama, Railway Engineering 1st. ED., Kansen, pp.58-65, 1981.
3) H. Shimazen, Advanced Rolling Stock Engineering 2nd ED., Bunyausha, pp.196-203, 1981.
4) A. C. Ugural, Stress in Plates and Shalls, McGraw-Hill. Inc., pp.102-105, 1981.
5) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity 3rd ED., McGraw-Hill Inc., pp.235-242, 1970.
6) S. M. Yang, H. Y. Kang, H. S. Yu and H. H. Song, "An Evaluation of Effective Nugget Size and Stress Concentration Factor by Infrared-Thermography in Spot Weldment," Spring Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.636-641, 2002.
7) O. S. Lee, S. W. Hwang and K. C. Nah, "Contact Singular Stress with Relief Notch by Using Dynamic Photoelasticity," Transactions of KSAE, Vol.4, No.1, pp.55-62, 1996.
8) C. Y. Niu, Airframe Structural Design : Practical Design Information and Data on Aircraft Structures, Lockheed Aeronautical Systems Company, Chapt. 7, 1988.
9) L. E. Jarfall, Optimum Design of Joints: The Stress Severity Factor Concept, The Aeronautical Research Institute of Sweden, 1967.
10) J. H. Song, H. G. Noh, A. Shimamoto, H. S. Yu, H. Y. Kang and S. M. Yang, "Analysis of Effective Nugget Size by Infrared Thermography in Spot Weldment," Int. J. Automotive Engineers, Vol.5, No.1, pp.55-59, 2004.
11) Y. Kitsunai, T. Honda and T. Sasaki, "The Determination of Stress Concentration Factor and Stress Intensity Factor by Means of Thermoelastic Stress Analysis," Transaction of JSME, Vol.64, No.627, pp.114-119, 1998.
12) A. Shimamoto, H. Ohkawara, F. Nogata and S. M. Yang, "Experimental Study of The Principal Stresses Separation Using a Combination of Photoelasticity and Thermoelastic Stress Analysis," International Journal of Modern Physics B, No.1/2, pp.1427-1433, 2003.